

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**



**COMPENSACION REACTIVA EN PLANTAS INDUSTRIALES CON  
CARGAS NO LINEALES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**JOSE ANTONIO TAPIA GUIMARAY**

**PROMOCIÓN  
2003-II**

**LIMA-PERÚ  
2009**

**COMPENSACION REACTIVA EN PLANTAS INDUSTRIALES CON  
CARGAS NO LINEALES**

## SUMARIO

El presente informe aborda el estudio de niveles de tensión en los tableros de distribución, flujos de potencia activa y reactiva en los conductores, arranque de motores y la presencia de distorsiones armónicas en las instalaciones eléctricas de una planta industrial. También se determina la compensación reactiva para mejorar el factor de potencia de la red eléctrica debido a que la mayoría de las cargas son motores de inducción. La deformación en la forma de onda sinusoidal tanto de la tensión como de la corriente puede sobrepasar ciertos límites en las redes de instalaciones industriales que tienen fuentes de perturbaciones armónicas tales como: motores eléctricos, equipos electrónicos de cómputo, alumbrado con lámparas de descarga, tubos fluorescentes y lámparas fluorescentes compactas, etc.

Por estas razones ha sido de interés, analizar mediante simulaciones las instalaciones eléctricas de una planta industrial. Para dichas simulaciones se ha usado el NEPLAN 5.2.4, que es un software especializado para instalaciones industriales y los resultados obtenidos han sido satisfactorios y propios de este tipo de redes eléctricas.

Los resultados obtenidos muestran la ausencia de armónicos significativos, así como niveles de tensión aceptables en el sistema eléctrico de dicha planta industrial en su operación actual; sin embargo con la incorporación de un motor de potencia, como nueva carga, será necesario un banco de condensadores para mejorar el factor de potencia, cuya potencia reactiva necesaria también se ha determinado en este trabajo.

## ÍNDICE

<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCION</b>	2
1.1. Objetivos del informe.	2
1.2. Organización del trabajo.	4
1.3. Alcances del informe.	4
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEORICO CONCEPTUAL</b>	5
2.1. Energía activa y reactiva.	5
2.2. Factor de potencia.	6
2.3. Métodos de compensación del factor de potencia	8
2.4. Ubicación de los condensadores	8
2.5. Tipos de compensación reactiva	10
2.6. Compensación individual	10
2.7. Compensación global o parcial	13
2.8. Definición de potencia para cargas no lineales.	14
2.9. Cargas no lineales de uso industrial	15
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA EN CARGAS NO LINEALES</b>	17
3.1. Cargas controladas electronicamente.	17
3.2. Efectos de una compensacion convencional.	19
3.3. Efectos en otras cargas y la red.	21
3.4. Compensacion con filtro activo shunt.	22
3.4.1. Inversor fuente de tensión controlado en corriente (IFTCC)	22
3.4.2. Sistema de control, generador de corriente de referencia.	23
3.5. Consideraciones practicas de la instalación de condensadores	25

**CAPÍTULO IV****SISTEMA ELECTRICO DE LA PLANTA INDUSTRIAL**

4.1.	Introduccion.	27
4.2.	Ubicación del proyecto.	27
4.3.	Condiciones climatologicas.	27
4.4.	Caracteristicas de la Subestacion.	27
4.5.	Instalaciones Existentes.	28
4.6.	Instalaciones Proyectadas	28

**CAPÍTULO V****ANALISIS DE LA OPERACIÓN EN REGIMEN PERMANENTE**

5.1.	Modelos para flujo de carga	29
5.1.1.	Fuente de alimentación	29
5.1.2.	Transformadores.	30
5.1.3.	Conductores y cables de energia.	30
5.1.4.	Cargas.	30
5.1.5.	Capacitores shunt.	30
5.2.	Resultados de la operación en regimen permanente.	31
5.2.1.	Balance de potencia y perdidas electricas del sistema.	31
5.2.2.	Tensiones en barras y control de reactivos	33
5.2.3.	Flujos de potencia y sobrecarga de redes	3
5.3.	Análisis de Tensiones para Arranque de Motores	34
5.3.1.	Modelos para arranque de motores	35
5.3.2.	Equivalente de red	35
5.3.3.	Elementos de la red: cables y tableros	35
5.3.4.	Cargas asociadas a motores	35
5.3.5.	Dispositivo de arranque de motores	36
5.3.6.	Cargas asociadas a iluminación	36
5.3.7.	Capacitores shunt	36
5.3.8.	Resultado del análisis de Tensiones	36
5.3.9.	Torque mecánico y eléctrico de motores del sistema	36
5.3.10.	Tensiones en motores del sistema	37
5.4.	Análisis de distorsión armónica	37
5.4.1.	Resultados del análisis de distorsión armónica	39

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
ANEXOS	42
BIBLIOGRAFÍA	43

## **PROLOGO**

El análisis de tensiones en los tableros de distribución de una planta Industrial, así como el arranque de motores y la determinación de distorsión armónica mediante simulaciones con un software especializado es presentado en este trabajo, motivado principalmente por la incorporación de motor de 75 HP como carga nueva y que crea expectativas en la operación del sistema eléctrico de dicha planta.

El incremento acelerado del uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos, debido principalmente al auge de la electrónica de potencia en estos últimos años, ha provocado una situación problemática, a veces grave, donde las corrientes armónicas generadas por los propios equipos electrónicos distorsionan la onda de corriente sinusoidal original y perturban la operación de estos mismos equipos provocando además, calentamientos excesivos y pérdidas de energía en maquinas eléctricas, conductores y demás equipos del sistema eléctrico. Las simulaciones para el presente estudio fueron realizados con respecto a los niveles de tensión en los tableros de distribución, flujos de carga en los conductores, arranque de motores y distorsión armónica en la red. En particular se tuvo especial tratamiento de esta nueva carga.

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### **1.1. Objetivos del informe.**

El objetivo del presente informe es mostrar el estudio realizado en las instalaciones eléctricas de una planta industrial de procesamiento de fruta, con la finalidad de analizar su operación en régimen permanente y condiciones normales, para más adelante incorporar una nueva carga de mayor potencia y analizar sus implicancias.

Las simulaciones para este estudio se realizan utilizando el software NEPLAN 5.2.4, con el cual se hace un análisis de flujo de carga para determinar el estado de operación del sistema eléctrico, determinando sus niveles de tensión en cada tablero de distribución así como los flujos de potencia activa y reactiva en cada tramo de la red. También se hizo una simulación para el arranque del motor trifásico de potencia, porque se conoce que en el momento del arranque la corriente que absorbe, es mucho mayor que la corriente nominal y provoca perturbaciones en el funcionamiento de otras cargas, pudiendo incluso hacer saltar las protecciones contra sobre intensidades.

Otro hecho que debe resaltarse es que los niveles de distorsión armónica presentes en las redes de distribución e instalaciones industriales han aumentado en los últimos años, por el incremento en el uso de equipos de conversión estática a tiristores, arrancadores y variadores de velocidad para motores, rectificadores, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.; además el aumento en la utilización de lámparas de descarga en gases, reactores con núcleo saturable y diversos equipos de características no lineales.

Estas armónicas pueden ocasionar una perturbación inaceptable sobre la red de distribución de energía eléctrica, y causar el recalentamiento de motores, cables y transformadores, el disparo de los interruptores termo magnéticos, el sobrecalentamiento (y posible explosión) de capacitores, y también el mal funcionamiento de distintos equipos como computadoras, sistemas de comunicaciones, máquinas de control numérico y equipos de control, protección y medición en general [1].

Para mantener la calidad de la tensión y la corriente de red dentro de un nivel aceptable para el mercado eléctrico moderno, las reglamentaciones vigentes exigen trabajar con armónicas que no superen ciertos valores límites establecidos, como por ejemplo los estándares de la IEEE-519 titulado “Prácticas Recomendadas y Requerimientos para control de armónicas en sistemas de potencia”, establece límites para la distorsión armónica tanto de la corriente como de la tensión eléctrica [2].

Si el sistema alimenta una carga no lineal, surgirán corrientes armónicas de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema. La presencia de corrientes armónicas junto con las posibilidades de resonancia del sistema, puede originar valores apreciables de tensiones armónicas superpuestas a la tensión fundamental del sistema, resultando una tensión en barras totalmente distorsionada.

Es importante conocer el porcentaje de contaminación en la planta industrial para evitar posibles problemas de resonancia, para ello se realiza simulaciones con el NEPLAN para determinar los niveles de contaminación de armónicos en la planta industrial y proponer la mitigación de estos.

En particular, un banco de capacitores de compensación de potencia reactiva en una instalación con equipos productores de armónicas, puede contribuir a producir una amplificación importante de los armónicos existentes. Al respecto hay que considerar que un capacitor presenta un camino de baja impedancia para las corrientes de las armónicas superiores. Por su parte, los capacitores de corrección del factor de potencia forman un circuito paralelo con la inductancia de la red de distribución y con la del transformador. Así las corrientes armónicas generadas por los elementos no lineales se dividen entre las dos ramas de este circuito paralelo, dependiendo de la impedancia presentada por el circuito para cada armónico. De esta manera, la corriente eficaz que pasa a través del capacitor y por la red de distribución puede ser mucho mayor que la generada por el equipo no lineal, si la frecuencia de una armónica característica de la carga no lineal con amplitud importante coincide, o está próxima, con la frecuencia de resonancia del circuito paralelo. Además de la resonancia paralelo, que es la más habitual, en la práctica también se encuentran situaciones de resonancia serie o combinaciones de ambas.

Se pone interés en la nueva carga a instalar de 75 HP por lo que se estudia y analiza la compensación reactiva antes y después de la instalación de la carga y se calcula la capacitancia que requiere la planta industrial.

## **1.2. Organización del trabajo.**

En el presente informe se hace una simulación de la operación de una planta industrial donde se tiene cargas no lineales, para observar su desempeño en cuanto a niveles de tensión, flujos de carga en los conductores eléctricos, análisis de armónicos y sub-tensiones en el arranque de motores. El trabajo se ha dividido en 4 capítulos: en el Capítulo I se fija los objetivos y el alcance del trabajo, en el Capítulo II se dan algunos conceptos teóricos que sirven de base para el buen entendimiento del trabajo, en el Capítulo IV se describe brevemente la planta industrial en estudio y que viene a ser una planta procesadora agroindustrial del distrito de Paucartambo, en el capítulo V se hacen el análisis de la operación en régimen permanente para el cual se realiza simulaciones con el software llamado NEPLAN v.5.2.4 , finalmente se dan las conclusiones y recomendaciones inherentes a los resultados.

## **1.3. Alcances del informe.**

El alumbrado con lámparas de descarga, tubos fluorescentes y lámparas fluorescentes compactas son generadores de corrientes armónicas estables. La componente armónica de tercer orden puede tomar valores significativos hasta llegar a sobrepasar el valor el valor pico de la fundamental.

Para limitar las tensiones armónicas de la red a valores aceptables (existen especificaciones y normas al respecto) se emplean filtros activos y pasivos. Muchas veces es necesario considerar la presencia de corrientes armónicas en el cálculo de la sección y la protección del neutro pues transporta la suma de las corrientes armónicas de las 3 fases.

Sin embargo en la planta industrial en la cual se hizo el presente estudio, solo se tiene cargas pequeñas, incluso los motores son de baja potencia, salvo un motor de 75 HP que se va instalar próximamente y el alumbrado con lámparas de descarga y lámparas fluorescentes compactas; por lo que en las condiciones actuales de operación no se ha podido encontrar mayores sobrecargas en los conductores ni mucha distorsión armónica, pero el análisis completo se hace con la nueva carga prevista para un futuro cercano, además de que se dan las bases para hacer el análisis mas completo en plantas industriales de mayor envergadura.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO CONCEPTUAL

Las tensiones y corrientes armónicas (transitorias, cíclicas ó estables) superpuestas a la onda fundamental provocan sobre el equipamiento eléctrico efectos no deseados de dos tipos:

Primero, son los efectos instantáneos en los sistemas electrónicos, las tensiones armónicas pueden perturbar los dispositivos de regulación e influir en los circuitos de conmutación. Las corrientes armónicas provocaran vibraciones y ruidos acústicos en los aparatos electromagnéticos (transformadores, inductancias, máquinas rotativas). También las líneas de datos y/o comunicaciones situadas paralelamente a una canalización de distribución eléctrica con corrientes y tensiones deformadas estarán afectadas por estas perturbaciones.

En segundo lugar tenemos los efectos permanentes; el efecto más importante a largo plazo producido por los armónicos son la perdidas por calentamiento. En forma general todo equipamiento eléctrico (transformadores, motores, cables, etc) sometido a tensiones o atravesados por corrientes armónicas sufren aumento en sus pérdidas y por lo tanto calentamiento que a su vez limita el tiempo de vida expectable de los mismos. Algunos tipos de alumbrado eléctrico son también fuentes de generación de corrientes armónicas estables. La componente armónica de tercer orden en estos casos puede tomar valores significativos hasta llegar a sobrepasar el valor el valor pico de la fundamental.

#### **2.1. Energía activa y reactiva.**

Las instalaciones eléctricas de corriente alterna requieren en general para su funcionamiento de dos formas de energía:

- a)** Energía activa (medida en Wh), la cual es convertida en energía mecánica, calor, etc.
- b)** Energía reactiva (medida en VARh), la cual es requerida por los circuitos inductivos como los motores eléctricos, transformadores, lámparas de descarga, capacidad de los cables, condensadores, etc.

En las instalaciones eléctricas de corriente alterna, las cargas son esencialmente inductivas, así como las reactancias de los sistemas de distribución y transmisión.

Estas cargas inductivas cíclicamente absorben energía del sistema (durante la creación de los campos magnético que necesitan para su funcionamiento) y entregan dicha energía al sistema (durante la destrucción de los campos magnéticos), dos veces en cada ciclo.

Este trasiego de energía entre las cargas y el sistema, provoca el incremento de la corriente que debe entregar el Sistema de Potencia, causando mayores pérdidas en los conductores y mayores caídas de voltaje. Por esta razón las compañías eléctricas penalizan el consumo de energía eléctrica aplicando recargos en la tarifa [6].

En las últimas décadas, ha sido muy importante la incorporación de cargas no lineales, tales como hornos de arco, rectificadores y muy especialmente controles electrónicos que emplean control de fase para gobernar cargas varias. Generalmente los fabricantes y usuarios de estos dispositivos se concentran en la exactitud del mando, su alta confiabilidad, el empleo de componentes cada vez más complejos que hacen más simples las funciones de control. Sin embargo se presta poca atención a los efectos que estos dispositivos tienen sobre la red de alimentación o más aún sobre las perturbaciones en otras cargas vecinas.

## **2.2. Factor de Potencia.**

La mayor parte de las cargas eléctricas se tipifican como cargas convencionales; estas se comportan linealmente, lo cual significa que al aplicar una tensión, la forma de onda de la corriente conserva esa misma forma, aunque en general estará desplazado en el tiempo un ángulo ( $\phi$ ). En estas circunstancias podemos definir las siguientes expresiones bien conocidas:

$$S = U \cdot I \quad (2.1)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (2.2)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\phi) \quad (2.3)$$

Donde:

S : Potencia Aparente [VA]

P : Potencia Activa [W]

Q : Potencia Reactiva [VAr]

U : Tensión por fase [V]

I : Corriente por fase [A]

Se puede graficar fasorialmente, en el triángulo de potencias definido en el plano x-y como se muestra en la Fig.2.1.

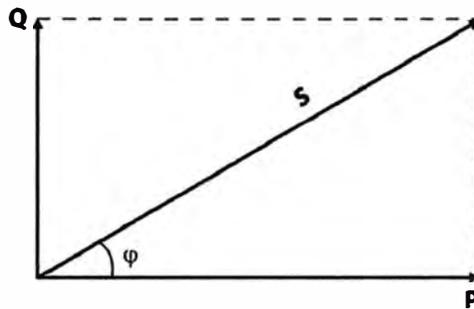


Fig.2.1. Triángulo de potencias

Las potencias así definidas son solamente magnitudes de cálculo, tiene verdadera importancia física el valor instantáneo  $p(t)$  de la potencia activa, que fluctúa según la ec.(2.4):

$$p(t) = u.i = U.I. \{ \cos(\varphi) - \cos[2\omega t - (\varphi)] \} \quad (2.4)$$

Con el doble de la frecuencia de la red alrededor del valor medio  $U.I.$  Para los circuitos trifásicos las expresiones de potencia se multiplican por 3 siendo los valores de  $U$  e  $I$  los de fase.

El factor de potencia (FP) se define como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente:

$$FP = \frac{P}{S} \cong \cos \varphi \quad (2.5)$$

La igualdad entre el FP y el  $\cos \varphi$  es válida para sistemas sinusoidales puros, no así cuando existe distorsión armónica. Del triángulo de potencias se deduce que su valor es menor que 1.

Las principales causas de un bajo factor de potencia en las instalaciones eléctricas de baja tensión son: motores eléctricos asíncronos sobredimensionados que operan con poca carga o en vacío, transformadores operando con poca carga o en vacío, lámparas fluorescentes o de descarga no compensadas, etc.

Las ventajas de la compensación reactiva para mejorar el factor de potencia son: reducción en la tarifa de energía, reducción de las pérdidas por efecto Joule, reducción de las caídas

de tensión y mejorar el factor de potencia, lo que a su vez significa conseguir valores cercanos a 1.

### **2.3. Métodos de compensación del factor de potencia.**

Los métodos de compensación del factor de potencia utilizados en las instalaciones eléctricas de baja tensión son:

- Instalar Condensadores de Potencia en paralelo con la carga inductiva a compensar.
- Utilizar máquinas sincrónicas de gran potencia trabajando como generadores de potencia reactiva.

El primer método es el que se utiliza en la actualidad en la mayoría de las instalaciones dado que es más económico y permite una mayor flexibilidad, y es el que estudiaremos en detalle en este curso.

El segundo, método utilizando las máquinas sincrónicas pueden funcionar como generadores de potencia reactiva, ya sea accionando cargas mecánicas o funcionando en vacío, siendo en este último caso conocidos como capacitores sincrónicos. La generación de potencia reactiva depende de la excitación, necesitando ser sobreexcitados para poder satisfacer sus propias necesidades de energía reactiva y entregar a su vez energía reactiva al sistema.

Este tipo de compensación no es muy utilizada, se utiliza sólo en el caso de que existan en la instalación motores sincrónicos de gran potencia (mayores a 200 HP) que funcionan por largos períodos de tiempo.

### **2.4. Ubicación de los Condensadores**

En principio los condensadores pueden ser instalados en cuatro posiciones bien definidas de una instalación eléctrica:

#### **a) Compensación individual**

En este caso los Condensadores se instalan junto a las cargas inductivas a compensar, y se obtienen todas las siguientes ventajas:

- Suprime las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
- Se reducen las pérdidas por efecto joule en los conductores.
- Se reducen las caídas de tensión.
- Se optimiza la instalación ya que la potencia y corriente reactiva no circula por la misma, sino que es suministrada por el condensador que está en paralelo con la carga.
- Descarga el transformador de potencia.

En instalaciones complejas presenta principalmente la desventaja de un elevado costo de instalación y mantenimiento.

Esta solución es utilizada para aquellas cargas de consumo constante y con muchas horas de servicio. Más adelante se detalla la compensación individual de motores y transformadores.

#### b) Compensación parcial por grupos

En este caso los Condensadores se instalan en tableros de distribución secundarios o Centros de Control de Motores (CCM).

Representa una solución intermedia, cuando se tienen tableros secundarios o CCM que alimentan muchas cargas de poca potencia, donde no se justifica una compensación individual.

Presenta las siguientes ventajas:

- Suprime las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
- Se optimiza una parte de la instalación, ya que la potencia y corriente reactiva no circula por los cables de alimentación de estos tableros secundarios.
- Se reducen las pérdidas por efecto joule en los cables de alimentación de estos tableros.
- Descarga el transformador de potencia.

Si las cargas tienen una variación importante en el consumo, se debe utilizar una compensación del tipo automática.

#### c) Compensación global centralizada

En este caso se instalan en el tablero general de baja tensión de la instalación eléctrica.

Presenta las siguientes ventajas:

- Suprime las penalizaciones por consumo excesivo de energía reactiva.
- Se ajusta la potencia aparente  $S$  (kVA) a la necesidad real de la instalación.
- Descarga el transformador de potencia.

Es una instalación más simple, centralizada y no interfiere con las cargas en el mantenimiento. Presenta las desventajas de que no se reducen las pérdidas en los cables, y en instalaciones complejas con carga variable se debe instalar una compensación del tipo automática

#### d) Compensación en media tensión

En este caso los condensadores se instalan en el lado de media tensión; es posible siempre que la instalación se alimente de la Red Pública de Distribución en media tensión.

No es una solución muy utilizada en las instalaciones, salvo en instalaciones industriales importantes.

Presenta esencialmente las siguientes desventajas:

- No libera capacidad en el transformador de potencia.
- No reduce las pérdidas por efecto joule.
- Exige un elemento de protección y maniobra de media tensión.
- Es más cara.

La solución óptima requiere en cada caso de un estudio técnico y económico, teniendo en cuenta las características de la instalación y el objetivo buscado.

En muchos casos lo más conveniente es adoptar soluciones mixtas, como la compensación individual para cargas constantes (por ejemplo: lámparas fluorescentes y de descarga, motores de gran potencia y que funcionan muchas horas), y una compensación automática centralizada o parcial por grupos para el resto de la instalación.

## **2.5. Tipos de Compensación reactiva**

Según el tipo de compensación se distinguen:

- a) Compensación fija.- Consta de una o más baterías de condensadores que suministran un valor constante de potencia reactiva. Los condensadores pueden ser comandados mediante interruptores, contactores, o conectados directamente a los bornes de la carga inductiva.
- b) Compensación automática.- En general se trata de un banco de varios pasos, los cuales son controlados según la variación del factor de potencia de la instalación por un relé varimétrico. Cada paso del banco está conformado por un elemento de protección (interruptor automático o fusible), un elemento de maniobra (Contactor) y una batería de condensadores trifásica. El relé varimétrico mide el factor de potencia de la instalación y conecta los pasos mediante los contactores de maniobra.

Este método es muy utilizado para una Compensación Global centralizada en el tablero general.

## **2.6. Compensación Individual**

- a) Compensación de motores asíncronos:

En la fig.2.2., se representan las curvas de potencia activa, reactiva y aparente consumidas por el motor, así como el factor de potencia “sin compensar” y el factor de potencia “compensado”, en función del % de carga del motor:

El factor de potencia de un motor asíncrono es bueno a plena carga, generalmente entre un 80 y 90 %, dependiendo de la velocidad y del tipo de motor. Sin embargo, para cargas

pequeñas el factor de potencia disminuye rápidamente, llegando a ser del 10 al 15% en vacío. Esto se debe a que la potencia reactiva consumida por el motor es prácticamente constante, mientras que la potencia activa es proporcional a la carga.

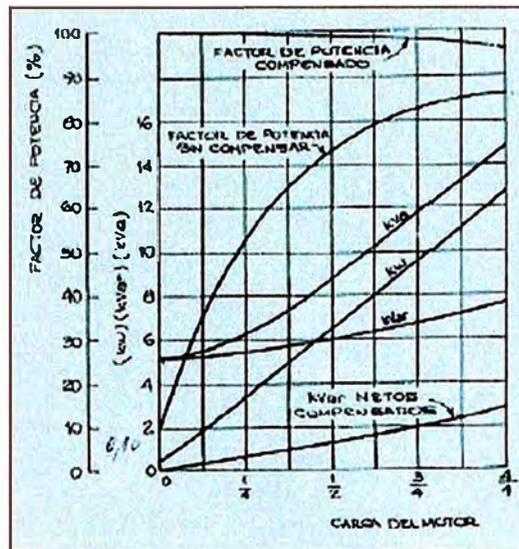


Fig.2.2. Curvas de potencias de un motor

Existe la compensación con Condensadores conectados en bornes del motor. Esta característica de los motores (potencia reactiva consumida prácticamente constante), permite la utilización de condensadores fijos conectados en paralelo en bornes del motor, para la compensación del factor de potencia.

En la conexión del Condensador directa en bornes del motor se deben tomar ciertas precauciones:

- Evitar el fenómeno de auto-excitación, cuando un motor se desconecta de la red, debido a la inercia de su carga continua girando, y el campo remanente del rotor genera una tensión en bornes del estator que normalmente cae a cero en 2 o 3 ciclos, en el caso de un motor no compensado.

En el caso en que se instala un condensador conectado directamente en los bornes del motor, este suministra corrientes capacitivas al estator que generan un campo magnético giratorio que se suma al campo remanente del rotor, incrementando la tensión en bornes del estator, pudiendo alcanzar tensiones elevadas. Este fenómeno se conoce como autoexcitación, y para evitarlo se debe limitar la potencia reactiva a instalar:

$$Q_c \leq 0,9\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0 \quad (2.6)$$

Donde:

$Q_c$ , potencia de la batería de condensadores

$U_n$  , tensión nominal

$I_0$  , corriente en vacío del motor

Otra forma de evitar el fenómeno de autoexcitación es utilizar un comando independiente para el Condensador, y que el Condensador sea conectado después que arranque el motor, y desconectarlo antes que el motor.

- Nueva regulación del relé térmico de protección del motor, se debe tener en cuenta que después de realizar la compensación con un condensador fijo conectado a los bornes del motor, la corriente eficaz que circula por el conjunto motor-condensador será menor que antes, por lo que se deberá ajustar el ajuste térmico de la protección del motor.

- En los casos de motores que arranquen con un arrancador de tensión reducida (arranque estrella triángulo, autotransformador, software u otro) siempre se debe utilizar un comando independiente para el condensador, y el condensador debe ser conectado después que arranque el motor, y desconectarlo antes que el motor.

b) Compensación de transformadores de potencia:

Los transformadores de potencia consumen una potencia reactiva que se compone de:

- La potencia reactiva consumida en vacío, debido a la reactancia magnetizante del transformador. Esta potencia es aproximadamente constante con la carga y tiene un valor de 1,8 a 2,5% de la potencia nominal del transformador para transformadores de MT/BT.

- La potencia reactiva absorbida por la reactancia serie del transformador.

En el caso de que la medida de energía de la Compañía Eléctrica Distribuidora sea realizada del lado de media tensión del transformador (contrato de energía en media tensión con subestación transformadora propia), la potencia reactiva del transformador debe ser tomada en cuenta, ya que la compañía estará midiendo la potencia reactiva de las cargas más la del transformador.

En estos casos se puede sobre compensar la instalación, instalando condensadores del lado de baja tensión, para compensar con ellos la potencia reactiva del transformador y la potencia reactiva de las cargas.

Pero se debe tener la precaución de evitar sobretensiones en condiciones de poca carga; cuando el transformador trabaje con poca carga circulará por el transformador una corriente capacitiva que elevará la tensión en bornes del secundario.

Como guía, cuando se instala un banco de condensadores en una instalación que cuenta con un transformador de alimentación de MT/BT, se recomienda que la potencia reactiva fija instalada no supere el 15% de la potencia nominal aparente del transformador.

## 2.7. Compensación global o parcial

Para realizar el cálculo de la potencia reactiva que es necesario compensar se debe determinar previamente la Potencia Activa (P) y el factor de potencia de la instalación ( $\cos\varphi_1$ ), y según el factor de potencia que se quiera lograr ( $\cos\varphi_2$ ), la potencia reactiva a compensar ( $Q_c$ ) vendrá dada por la fórmula:

$$Q_c = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (2.7)$$

Para determinar las potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia, se debe realizar el estudio de la potencia reactiva que es necesario compensar, se distinguen dos casos:

- Cuando se está en la etapa de proyecto de la instalación.
- Cuando la instalación ya está en funcionamiento y se quiere mejorar el factor de potencia de la instalación.

### a) Instalación en etapa de proyecto

En este caso, para hacer una evaluación de la potencia reactiva que consumirá la instalación, se debe disponer de todos los datos de las cargas (potencia activa y reactiva), así como los factores de utilización y simultaneidad que nos permita determinar las potencias activas y reactivas globales en cada nivel que se quiera compensar.

También se debe tener en cuenta la posibilidad de compensar en forma individual aquellas cargas como lámparas de descarga o fluorescentes, y motores importantes que funcionen por largos períodos de tiempo a carga constante.

### b) Instalación en funcionamiento

En este caso se pueden emplear diversos métodos para la determinación de la potencia reactiva a compensar.

- Instalando registradores para medir energías o potencias activa y reactiva en diferentes puntos de la instalación. Este es el método más completo de todos y puede dar mucha más información de la necesaria para diseñar la potencia de las baterías de condensadores a instalar.

En el caso de instalaciones que tienen un consumo variable en el día y en el mes, como puede ser en la industria por estar asociado a la producción, se deben realizar registros en distintos horarios y días para poder relevar las curvas de carga de consumos P y Q.

En el caso de instalaciones con un consumo aproximadamente constante, bastara con tomar algunas pocas medidas con una pinza vatimétrica, midiendo potencia activa, tensión y corriente.

- Utilizando el recibo de las energías consumidas en el mes, en el recibo de las Compañías Eléctricas Distribuidoras se obtienen los consumos mensuales de energía activa (Wh) y energía reactiva (VARh).

A partir de los recibos de varios meses (3 o 6 meses es lo usual) se pueden obtener los valores medios de energía activa y reactiva, y determinar la potencia reactiva media.

### 2.8. Definición de potencia para cargas no lineales.

Cuando no existe una relación matemática lineal entre la corriente y la tensión aplicada a un circuito, los conceptos antes enunciados no son suficientes, pues a pesar de alimentar al circuito con una tensión sinusoidal, circulan corrientes no sinusoidales. Por ello las definiciones deben ampliarse, haciendo la potencia aparente:

$$S = U.I = U\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (2.8)$$

A la potencia activa solo contribuye la onda fundamental de la corriente en:

$$P = P_1 = U.I_1.\cos \varphi$$

La potencia reactiva total es:  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$  que contiene dos componentes a saber, el reactivo de la onda fundamental:  $Q_1 = U_1.I_1.\text{sen}\varphi$ , y la potencia reactiva de deformación debida a las armónicas:

$$D = U\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots} \quad (2.9)$$

Las magnitudes así definidas pueden representarse gráficamente por medio de triángulos rectángulos en el espacio, como se muestra en la fig.2.3.

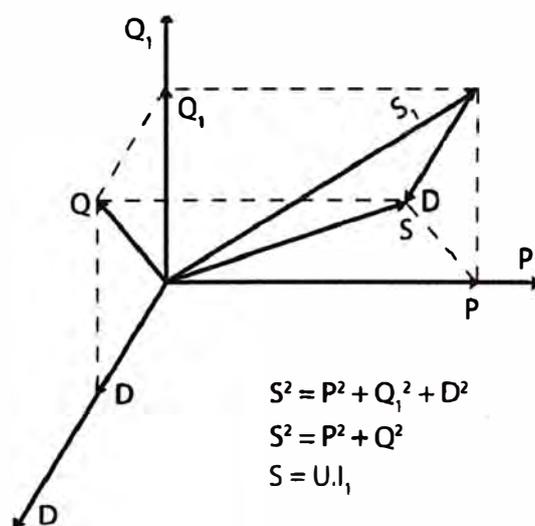


Fig.2.3. Relación de potencias en el espacio

El factor de potencia para ondas con contenido armónico será:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}{U \cdot I} = g_i \cdot \cos \varphi_1$$

Donde :

$$g_i = \frac{I_1}{I} \quad (\text{factor de la fundamental}) \quad (2.10)$$

El  $\cos \varphi_1$  , se denomina factor de potencia de la onda fundamental y efectivamente es una medida de desfase que existe entre la tensión y la componente fundamental de la corriente. Por consiguiente el factor de potencia  $\lambda$  con corriente no sinusoidal es menor que el factor de desplazamiento de la fundamental ó  $\cos \varphi_1$ . Estos dos conceptos a menudo se confunden, sin embargo solo son iguales para una corriente sinusoidal, o sea cuando el factor de la fundamental  $g_i = 1$ .

La compensación reactiva de cargas lineales es más conocida y en la mayoría de los casos basta colocar capacitores en paralelo ya sea sin regulación, fijos o automáticos; pero cuando nos trasladamos al campo de las cargas no lineales, aunque compensemos toda la componente fundamental de la corriente (I), el factor de potencia total será inferior a 1, pues no se ha compensado la potencia reactiva de distorsión.

## 2.9. Cargas no lineales de uso industrial.

Desde siempre los hornos de arco han sido y son grandes deformadores de la forma de onda de las instalaciones industriales, el encendido del arco, cuando se supera un cierto valor de tensión, hace que la corriente tenga formas empujadas con grandes picos, siendo en este caso el espectro armónico completo y con importantes variaciones de nivel.

Sin embargo en las últimas décadas la introducción del tiristor de potencia y su desarrollo ha hecho posible la disminución de costos y perfeccionamiento de equipos conversores AC/DC, y convertidores de frecuencia, que proporcionan un fino y exacto control de la velocidad en motores de corriente continua, y en los motores de inducción trifásicos, sin olvidar los grandes procesos electrolíticos de la industria electroquímica.

Consecuentemente con el incremento del uso de mandos con tiristores para pequeños y grandes proyectos, fuentes conmutadas (usadas por ejemplo en computadoras personales), lámparas de descarga, expansión en los procesos electrolíticos y elevación de la potencia de hornos de arco, los porcentajes de corrientes armónicas que fluyen en los sistemas de potencia se ha ido elevando mucho más que los incrementos de carga efectiva.

Es por ello que las empresas concesionarias del servicio eléctrico exigen, no solo la condición de un alto factor de potencia sino también, en algunos casos, no sobrepasar un cierto contenido armónico en la forma de onda de la corriente, de modo que por efecto de la caída de tensión deformada, la distorsión en la tensión no supere límites normalizados preestablecidos. Las deformaciones en la tensión alterna de la red pueden tener efectos sumamente perjudiciales en los equipos de control, regulación, computadoras, con defectos bastante difíciles de descubrir, producir pérdidas adicionales en máquinas rotativas con sobrecalentamientos por sobre los valores nominales.

### CAPITULO III

## COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA EN CARGAS NO LINEALES

Las cargas no lineales son aquellas que no mantienen la forma de onda de la tensión aplicada. Es decir si se conectan a una red de tensión sinusoidal, la corriente que circulará no será sinusoidal, aunque estén desfasadas entre sí un ángulo determinado. Según el análisis de Fourier: “Toda función periódica puede ser reemplazada por la suma de varias funciones sinusoidales. Una de ellas de la misma frecuencia que la onda sometida a estudio (llamada fundamental) y las demás de orden superior (llamadas armónicas)”.

### 3.1. Cargas controladas electrónicamente

Supongamos el circuito monofásico ilustrado en la Fig.3.1, en donde se controla una carga resistiva pura; en el control por corte aparecen en la carga corrientes no senoidales pero periódicas, que pueden desglosarse según Fourier en ondas fundamental y armónicos de amplitud y fase definidas, siendo en general que la amplitud disminuye a medida que aumenta el número de orden.

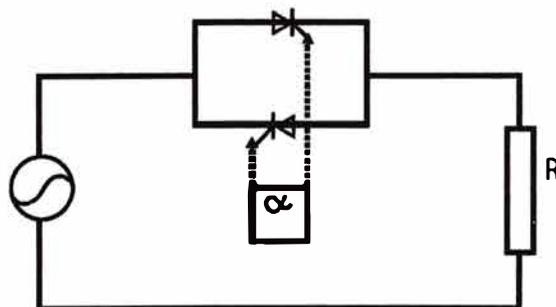


Fig.3.1. Control por corte, con tiristores

En las figuras 3.2 y 3.3, se representa la corriente  $I$  para una carga óhmica monofásica totalmente controlada y ángulo de control, cuya fundamental es  $I_1$ , la cual habiéndose hecho el cálculo de amplitud y fase por series de Fourier aparece retrasada respecto de la

tensión. Por lo tanto en la red de corriente alterna se tiene para el ángulo de control, una potencia reactiva  $Q$  de la fundamental inductiva aunque la carga sea óhmica:  $Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi$ . Al existir armónicas existirá también la potencia de deformación  $D$  que se calculará con los métodos antes vistos. Parece muy extraño tener potencia reactiva con una carga y un sistema conversor que no puede almacenar energía, pero ocurre que al existir dos tipos de potencias reactivas  $Q$  y  $D$  estas se complementan instante a instante.

Los conceptos enunciados para este control monofásico también son válidos para los circuitos trifásicos, en este último caso los órdenes armónicos presentes van en función al número de pulsos del circuito rectificador.

Por lo general no aparecen armónicos pares y de las impares las de característica homopolar pueden eliminarse fácilmente con conexiones adecuadas en los transformadores de alimentación.

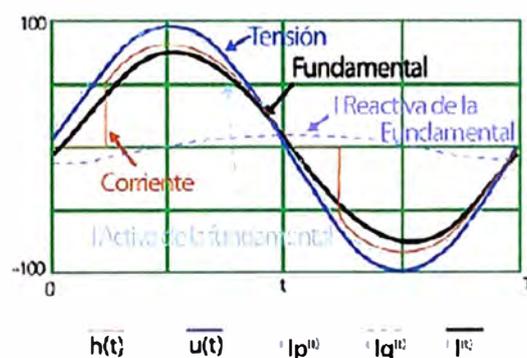


Fig.3.2. Forma de onda para un ángulo de disparo pequeño

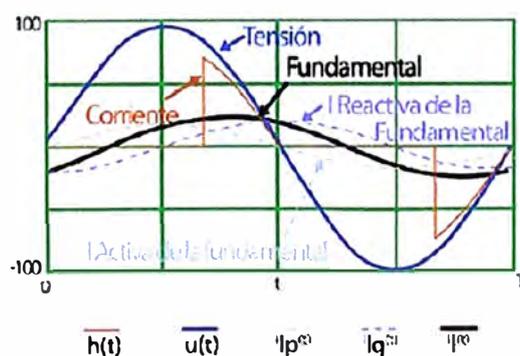


Fig.3.3. Forma de onda para una carga óhmica controlada con mayores ángulos

En la Fig.3.2, se muestran las formas de onda para un ángulo de disparo pequeño, donde se puede observar que la fundamental y su componente activa prácticamente coinciden. La componente reactiva es de un valor relativamente pequeño.

Para ángulos de disparo mayores, la corriente reactiva tiene mayor importancia relativa, conduciendo a un desmejoramiento del factor de potencia, como se observa en la Fig.3.3.

### 3.2. Efectos de una compensación convencional

Por lo que se ha visto hasta ahora las cargas convencionales tienen un contenido armónico relativamente bajo que no afecta a capacitores destinados a la corrección del factor de potencia, es así que para compensar motores asíncronos, artefactos de iluminación, o cargas inductivas en general, un capacitor conectado en derivación con la carga es suficientemente efectivo y por él la circulación de armónicas se limita a valores razonables; aunque es siempre conveniente controlar su nivel, pues como se vera más adelante, las corrientes armónicas pueden provenir desde otro consumo independiente de las cargas compensadas.

Sí en cambio las cargas son netamente deformadas como las provenientes de un control electrónico de velocidad, las consideraciones a tener en cuenta, partirán de un análisis más riguroso.

Para el circuito indicado en la Fig.3.4, existirá una fuente armónica en la carga controlada electrónicamente, en la cual puede demostrarse, existirá todo el espectro armónico impar, exceptuando (si no existe conexión de neutro) los armónicos homopolares 3, 9, 15, etc.

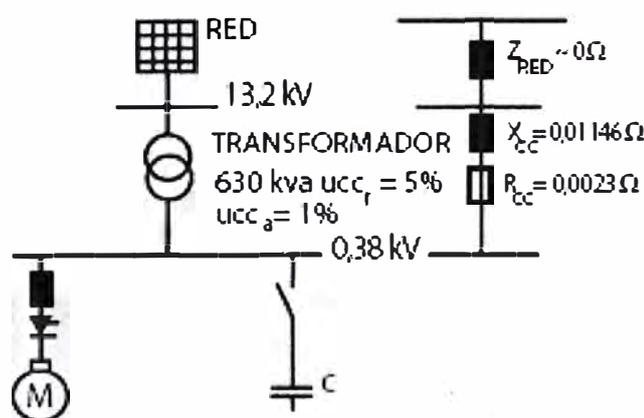


Fig.3.4. Fuente de armónicos: control electrónico de velocidad

De todos modos si existe conexión de neutro y armónicas homopolares, quedarán confinadas dentro de la conexión delta del primario. Por otro lado el circuito equivalente a

la frecuencia  $\nu$ , distinta de la fundamental será el indicado en la siguiente Fig.3.5, en donde se ve claramente que la fuente distorsiva alimenta a un circuito paralelo que tiene en una de sus ramas al capacitor y en la otra la impedancia de la red.

Es por esto que a este fenómeno se lo denomina resonancia paralelo. El circuito rectificador se transforma en un generador de corriente constante armónico  $I$  aplicado a bornes a- b.

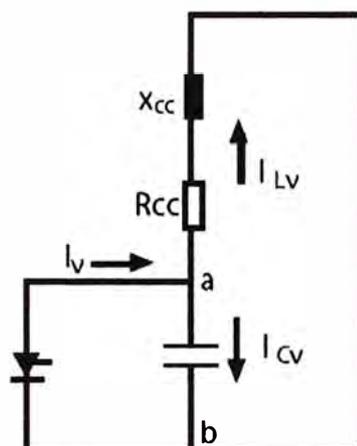


Fig.3.5. Circuito distorsiva alimenta a un circuito en paralelo

La Fig.3.6, muestra cómo evolucionan en función de la frecuencia la Impedancia que ofrecen la red (a través de un transformador de 630 kVAr con  $u_{cc}=5\%$ ) y el banco de capacitores, existiendo una igualdad de ambas a 250 Hz, dicho de otra forma se manifestará resonancia para la armónica 5ta.

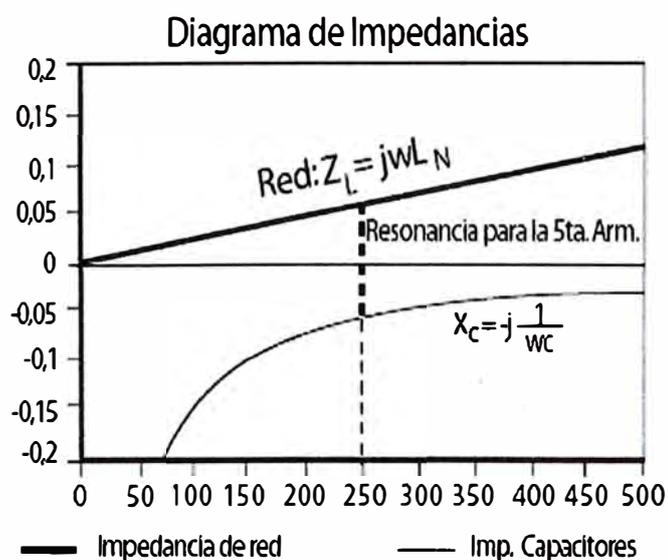


Fig.3.6. Evolución de la impedancia en función de la frecuencia

Sí la potencia del banco de capacitores es la variable a medida que aumentamos ese parámetro existirá resonancia para las frecuencias más bajas que por otro lado son las que el equipo conversor genera con mayor amplitud como se observa en la Fig.3.7.

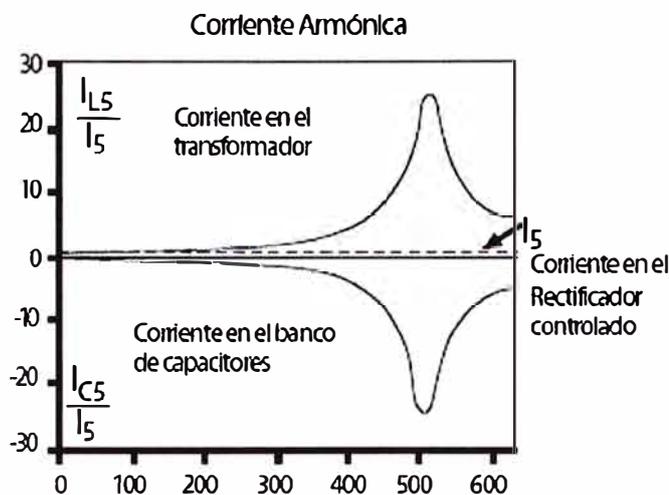


Fig.3.7. Corrientes en el equipo conversor

### 3.3. Efectos en otras cargas y la red

Más allá de la amplificación de armónicas, la propia corriente  $I_v$  puede ser lo suficientemente importante como para causar perjuicios en otras cargas o la red. En estos casos existen dos soluciones posibles:

Emplear en el o los bancos de capacitores, una bobina de reactancia antirresonante, que se acopla en serie con el condensador de compensación y que presta a la instalación un carácter inductivo en caso de frecuencias armónicas críticas, esta solución contribuye a la reducción del valor de  $I_v$ , generalmente a valores aceptables, aunque no lo hace selectivamente, filtrando en mayor proporción las armónicas de orden inferior, que son por otro lado, las de mayor importancia en redes industriales.

Cuando la  $I_v$  adquiere valores de espectro significativo, la alternativa es incorporar filtros sintonizados para liberar a la red principal de las armónicas de todo orden mediante circuitos dedicados para filtrarlas. En contraposición al caso anterior, los circuitos de filtro se sintonizan muy próximos a la armónica que debe filtrarse, es decir, se necesita un circuito LC para cada armónica que se filtra. De esta forma, para las armónicas, la impedancia efectiva es prácticamente nula.

### 3.4. Compensación con filtro activo shunt.

Una de las topologías más adecuada para la compensación de las armónicas y reactivo es el denominado Filtro Activo de Potencia Shunt (FAPS). En la Fig.3.8., se presenta una estructura general de un FAPS, el mismo consiste de un Inversor Fuente de Tensión trifásico Controlado en Corriente (IFTCC) conectado a la red a través de un inductor de acoplamiento y un transformador. El inductor de acoplamiento podría ser no considerado si la inductancia de dispersión del transformador es suficiente para limitar las corrientes de ripple a niveles aceptables. Las referencias de corriente del IFTCC son generadas por el sistema de control basado en la teoría de la potencia reactiva instantánea. Entonces el análisis del FAPS es dividido en dos principales secciones: el IFTCC y el bloque de control para obtener las corrientes deseadas y mantener la tensión de continua del IFTCC.

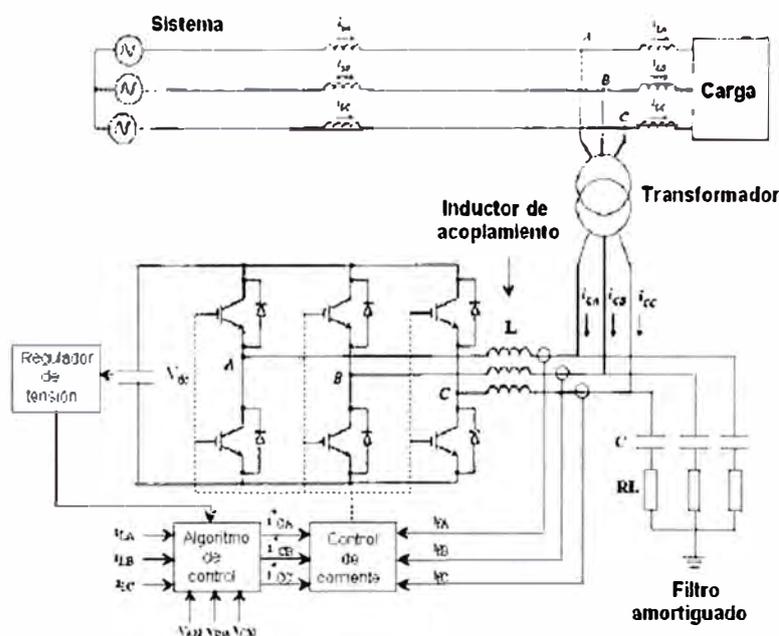


Fig.3.8. Estructura general de un FAPS

#### 3.4.1. Inversor fuente de tensión controlado en corriente (IFTCC)

El IFTCC es un inversor fuente de tensión estándar de dos niveles con IGBTs. El lazo de corriente es implementado con un controlador por histéresis o banda de histéresis. La corriente de salida a través del inductor de acoplamiento es muestreada a una frecuencia fija con el fin de limitar la frecuencia de conmutación del inversor. El inversor es conectado al PAC a través de un inductor de acoplamiento. El valor de la inductancia

resulta de un compromiso entre el filtrado de las altas frecuencias producidas por la conmutación del convertidor y admitir un alto  $di/dt$  sobre el inductor que permitan la compensación de las corrientes armónicas a ser atenuadas o eliminadas. Las frecuencias de conmutación son fuertemente filtradas con un filtro paralelo de segundo orden el cual deriva las corrientes de altas frecuencias del PAC. El lado de continua del convertidor (CC) está formado sólo con un capacitor con un valor apropiado. La capacidad es calculada de forma tal de mantener un bajo ripple de la tensión de CC, 1%.

El valor de la tensión de CC de diseño es tal que el convertidor pueda suministrar las derivadas temporales de la corriente demandadas por las armónicas a ser compensadas. Entonces cuando más altas sean las armónicas requeridas al FAPS, más alto es el nivel de tensión necesario en el lado de CC, y más alta es la tensión de bloqueo requerida a los IGBTs de potencia y más alta es la frecuencia de conmutación necesaria para el seguimiento de las corrientes de referencia. La tensión de CC es controlada con un controlador proporcional el cual modifica la potencia activa de referencia en el convertidor la cual es analizada en el próximo punto. Finalmente el transformador de acoplamiento adapta los niveles de tensión de la red de potencia (Alta tensión) al nivel de tensión alterna obtenido del IFTCC (baja) del lado CC. A su vez, este transformador provee filtrado adicional de las frecuencias de conmutación.

### 3.4.2. Sistema de control, generador de corriente de referencia

Fundamentalmente el sistema de control mide las tensiones de fase ( $v_a$   $v_b$   $v_c$ ) y corrientes de fase ( $i_a$   $i_b$   $i_c$ ) en la carga y calcula las corrientes de referencia para el IFTCC usando la teoría general de la potencia reactiva instantánea en sistemas trifásicos, denominada “teoría pq”[3]. Primeramente las variables medidas son transformadas al marco estacionario  $\alpha\beta$  a través de la transformada de Clarke.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Luego son calculadas las potencias instantáneas,  $p$ : potencia activa,  $q$ : potencia imaginaria y  $p_0$ : potencia de secuencia cero.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{p_0} \\ \overline{p} \\ \overline{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_0 \\ \tilde{q} \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

El sistema en estudio es un sistema de tres hilos con lo cual la secuencia cero puede ser despreciada, entonces en lo sucesivo se consideran sólo  $p$  y  $q$ . En el caso general de cargas no lineales,  $p$  y  $q$  poseen componentes de continua (CC) y de alterna (CA). El valor medio de la potencia activa instantánea ( $p$ ) es igual a tres veces la potencia activa por fase, mientras que el valor medio de la potencia imaginaria instantánea ( $q$ ) es igual a tres veces la potencia reactiva por fase. Las componentes de CA de ambas potencias instantáneas corresponden a la contribución de las armónicas. En general la red debería abastecer el valor de CC de la potencia activa mientras que su componente de CA también como la potencia imaginaria completa debería ser abastecida por el FAPS. Luego la potencia activa instantánea es filtrada de forma tal de separar ambas componentes y calcular los valores de referencias  $p^*$  y  $q^*$ . Luego los valores de las corrientes de referencia en el marco  $\alpha\beta$  y de fase instantánea ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) del IFTCC deberían ser:

$$\begin{bmatrix} i_{c_a} \\ i_{c_b} \\ i_{c_c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c_\alpha} \\ i_{c_\beta} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{c_\alpha} \\ i_{c_\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix}$$

Cuando las tensiones de la red son distorsionadas, las corrientes calculadas con las ecuaciones previas no compensaran exactamente las armónicas. Luego es deseable obtener tensiones puramente sinusoidales en lugar de las directamente medidas.

Esto es realizado con un lazo de enganche de fase (Phase Locked Loop o PLL) el cual sincroniza con las tensiones de secuencias positiva sinusoidales de fase. La salida del PLL son tensiones de fase puramente sinusoidales ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ,) las cuales son utilizadas para sincronizar las corrientes del filtro y también para calcular las potencias instantáneas. La fig.3.9, muestra el diagrama en bloques del control implementado para el FAPS.

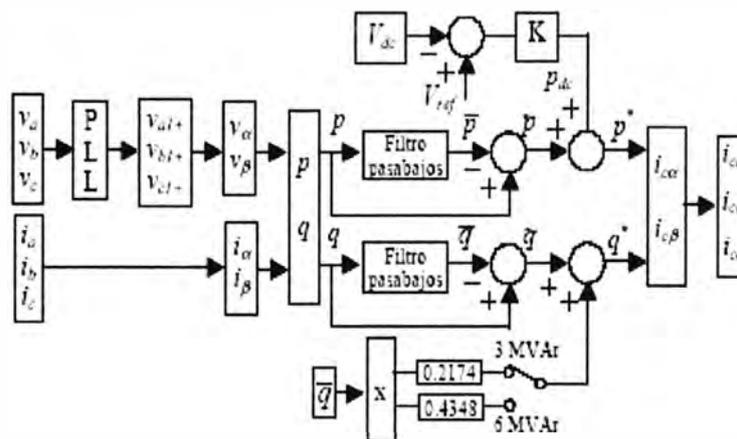


Fig.3.9. Diagrama en bloques del control del FAPS

### 3.5. Consideraciones practicas de la instalación de condensadores

Los condensadores de potencia se caracterizan por tener:

$U_n$ , tensión eficaz nominal (V)

$f_n$ , frecuencia nominal (Hz)

$Q_n$ , potencia reactiva entregada a tensión y frecuencia nominal (kVAr)

$I_n = \frac{Q_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$ , corriente nominal (A)

La potencia reactiva entregada por el condensador varia con la tensión y la frecuencia según la ec. (3.4)

$$Q_{\text{Cestrella}} = U_n^2 \cdot \omega \cdot C \quad (3.4)$$

La norma que regula la fabricación de los condensadores de potencia de baja tensión es la IEC 60831[4] y establece, entre otros, los siguientes requerimientos:

- Capacidad de sobre corriente permanente: 30% para los condensadores estándar.
- Capacidad de sobretensión permanente: 10% para los condensadores estándar.

- Resistencia de descarga: los condensadores almacenan cargas eléctricas que luego de su desconexión pueden resultar peligrosas para las personas durante su operación. Para reducir estas tensiones a valores seguros se emplean resistencias de descarga. La norma establece que la tensión en bornes de un condensador no debe exceder de 75 V transcurridos 3 minutos desde su desconexión.

Los Condensadores en la actualidad, cumplen en su mayoría con las siguientes características:

- Son de construcción seca, por lo cual no tienen riesgo de incendio.
- Son del tipo auto-regenerables, lo que implica que frente a pequeñas fallas internas de perforación del dieléctrico, este se regenera de forma de poder seguir en funcionamiento.
- Cuentan con resistencias de descarga.
- Protección interna con fusible interno de alta capacidad de ruptura contra cortocircuitos y sistema de sobrepresión que produce la desconexión en forma mecánica del elemento cuando aumenta la presión en el interior del elemento.

## **CAPITULO IV**

### **SISTEMA ELECTRICO DE LA PLANTA INDUSTRIAL**

#### **4.1. Introducción.**

La Planta Industrial de procesamiento de fruta, ubicado en el distrito de Paucartambo, Departamento de Cerro de Pasco, ha previsto ampliar su capacidad de atención a la demanda de molienda de granos para lo cual han proyectado adquirir un motor de 75 HP. Esta ampliación crea muchas preocupaciones en los administradores de esta empresa, motivo por el cual se hace este trabajo, con la finalidad de determinar las condiciones de operación del nuevo sistema eléctrico de la planta industrial.

#### **4.2. Ubicación del proyecto.**

La Planta Industrial de procesamiento de Fruta - Paucartambo se encuentra ubicado en la parte sur-este de la provincia de Pasco en la Región Pasco, en la zona centro del territorio nacional en las estribaciones oriental de la cordillera occidental.

#### **4.3. Condiciones Climatológicas.**

Entre los principales parámetros se tienen la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa media, cuyos valores son mostrados a continuación:

- a) Temperatura Ambiente
  - Mínima                      4 °C
  - Máxima                      23 °C
  - Promedio                      20 °C
- b) Velocidad del Viento              100 km/hr
- c) Humedad relativa media              85%

#### **4.4. Características de la Subestación.**

La subestación es del tipo Aérea trifásica Biposte, de propiedad de Electrocentro, en el nivel de tensión de 10 KV con 01 transformadores de 10 KV y potencia de 750 KVA, con salida en 0,38/0.22 KV

#### **4.5. Instalaciones Existentes.**

El Sistema Eléctrico de la Planta Agroindustrial de Procesamiento de fruta esta alimentada con tensión de baja tensión en 380 Voltios. Está conformado por un Tablero General y 05 Sub-tableros de distribución dispuestos de la siguiente manera:

Tablero de distribución TD01, alimenta 11 motores.

Tablero de distribución TD02, alimenta 5 motores.

Tablero de distribución TD03, alimenta 4 motores.

Tablero de distribución TD04, alimenta 2 motores y la iluminación interior.

Tablero de distribución TD05, alimenta iluminación exterior.

#### **4.6. Instalaciones Proyectadas.**

La nueva instalación proyectada a corto plazo es de un motor eléctrico de 75 HP para un molino de café y granos (cebada y trigo) cuya demanda es inminente en la zona. Para dicho objetivo se ha previsto un nuevo tablero al mismo nivel de tensión (380 V).

Esta nueva carga modifica la topología del sistema eléctrico existente y se piensa que va producir grandes caídas de tensión en la barra o tablero donde va conectada, para lo cual fue necesario hacer simulaciones en este trabajo, con el objetivo de prever los nuevos niveles de tensión en el arranque y los flujos de potencia activa y reactiva, para consecuentemente proponer una solución con compensadores de reactivos o arrancadores para dicho motor.

Asimismo es de preocupación la determinación de la presencia de distorsión armónica que podría ocurrir en su operación normal dentro de la planta industrial.

## **CAPITULO V**

### **ANALISIS DE LA OPERACIÓN EN REGIMEN PERMANENTE**

El análisis de la operación en régimen permanente consiste en determinar las variables de estado del sistema eléctrico definidas por las tensiones en barras módulo y ángulo, y variables de interés como: flujos de potencia (activa y reactiva) en los ramos (cables), pérdidas de potencia en ramos, reactivos de compensación para control de tensión, entre otros.

Para este análisis se usó la herramienta de flujo de carga incluida en el software de simulación de redes eléctricas NEPLAN versión 5.2.4

#### **5.1. Modelos para flujo de carga**

Los distintos componentes que conforman el sistema eléctrico son modelados de acuerdo a su representación en régimen permanente. A continuación se menciona algunos detalles usados en estos modelos.

##### **5.1.1. Fuente de alimentación**

En condición de operación normal el punto de entrega de energía es modelado en la barra 0.38 kV, es decir se usa un equivalente de red con una potencia de cortocircuito trifásico igual a 0.8 MVA, obtenido de la referencia [5], y  $R1/X^1$  igual a 0.1. Esta barra de alimentación asume el balance de potencias y las pérdidas eléctricas del sistema. Esta alimentación de la red eléctrica externa en el modelamiento viene a ser una red de equivalente Thevenin.

En condiciones de posible sobrecarga, cuando el motor de 75 HP entra en operación para el cual se ha previsto una salida especial en el tablero general y será conectado al sub-tablero de distribución que se ha denominado TD06, en el momento del arranque se debe tener en cuenta la caída de tensión que no sea muy severa, lo que realizará un arranque suave de dicho motor, ya que ésta es la única carga crítica prevista para el futuro.

---

<sup>1</sup> Valores típicos de  $R/X$  para niveles de tensión de 0.38 kV.

### **5.1.2 Transformadores**

Los transformadores son modelados como elementos pasivos usando el equivalente  $\pi$  y fase según el grupo de conexión. En la instalación industrial motivo de estudio tiene un transformador de potencia cuya relación de transformación es de 13,2/0,38-0.22 kV, ya que la alimentación es directa desde la red de la empresa ELECTROCENTRO.

### **5.1.3 Conductores y cables de energía**

Los cables de energía son modelados como elementos pasivos usando resistencias y reactancia en serie, según la información de la referencia [5] y manuales de fabricante como en la referencia [7]. Las susceptancias shunt de los cables subterráneos son llevadas en cuenta, pero se pronostica un efecto despreciable.

### **5.1.4 Cargas**

Las cargas, de toda la instalación, son modeladas en régimen permanente como absorción de potencia constante, es decir los tableros de conexión de estas cargas son modeladas como barras PQ (potencias de carga activa y reactiva constantes).

Las cargas de iluminación son modeladas con un factor de potencia (FP) de 0.95 y con factores de carga (FC) de 1. Los valores de potencia activa son definidos a partir del consumo de los mismos.

Las cargas asociadas a motores pequeños son modeladas con un FP de 0.9 y FC que oscilan entre 0.5 a 1 de acuerdo a su tiempo de operación. Los valores de potencia activa son definidos a partir del consumo de los mismos, así la potencia efectiva mecánica es calculada a partir de la eficiencia de cada motor. La mayoría de motores menores de 7HP son analizados y totalizados en cada una de los tableros donde están conectados.

Dentro del espectro de armónicos generado, en régimen permanente solo es llevado en cuenta la componente fundamental (frecuencia eléctrica igual a 60 Hz), es decir los valores de potencia activa totales son definidos a partir del consumo del mismo y reflejado a la componente de frecuencia fundamental.

### **5.1.5 Capacitores shunt**

Como se mencionado anteriormente, no se tiene banco de condensadores instalados, pero a raíz de este estudio se va sugerir la conexión de un banco de condensadores. Estos bancos se modelan durante el análisis en régimen permanente como elementos capacitores con admitancias de operación calculada a partir de los valores nominales de potencia reactiva.

Los parámetros eléctricos en régimen permanente de los equipamientos del sistema eléctrico de la planta industrial asociado se muestran en el Anexo A.

## 5.2. Resultados de la operación en régimen permanente

Se realizaron las simulaciones de flujo de carga de acuerdo a las premisas anteriores para condiciones de operación normal y posteriormente con el motor de 75 HP proyectado. Es importante resaltar que se tuvo énfasis en la nueva carga, y que fue uno de los móviles para el presente trabajo.

### 5.2.1 Balance de potencia y pérdidas eléctricas del sistema

En las simulaciones realizadas para las condiciones actuales se obtuvieron resultados óptimos desde el punto de vista que no hubo grandes caídas de tensión ni potencias excesivas, como se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Tensiones y Potencia en los Tableros y cargas

Tablero	Cargas	Tensión(V)	P(kW)	Q(kVAr)
General	TD01	379,8	31,5	21,7
	TD02	379,9	9,9	7,2
	TD03	380	11	7,4
	TD04	379,6	19,75	19
	TD05	380	4,11	0
TD01	B-01	379,8	2,8	1,7
	B-02	379,8	2,3	1,7
	B-03	379,8	1,7	1,7
	B-04	379,8	1,6	0,8
	B-05	379,7	5,3	2,6
	B-06	379,7	2,5	1,9
	B-07	379,7	6,2	4,6
	B-08	379,7	2,3	1,7
	B-09	379,7	2,3	1,7
	B-10	379,7	2,2	1,6
TD02	B-15	379,7	2,3	1,7
	B-17	379,9	1	0,5
	B-18	379,9	2,1	1,6
	B-19	379,9	1,9	1,4
	B-13	379,9	2,5	1,9
TD03	B-14	379,9	2,4	1,8
	B-21	380	2,5	1,9
	B-22	380	5,2	3,2
	B-23	380	0,8	0,4
TD04	B-24	380	2,5	1,9
	B-25	379,6	9,3	9,5
	B-26	379,6	9,3	9,5
TD05	B-28	379,6	1,1	0
	B-176499	379,8	4,1	0

De manera similar se realizo las simulaciones incluyendo la nueva carga; es decir, el motor de 75 HP el que se proyecto instalar en el sub-tablero de distribución TD-06, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Tensiones y Potencia incluyendo la nueva carga

Tablero	Cargas	Tensión(V)	P(kW)	Q(KVAr)
General	TD-01	379,8	31,5	21,7
	TD02	379,9	9,9	7,2
	TD03	380	11,00	7,4
	TD04	379,6	19,75	19
	TD05	380	4,11	0
	TD06	364,2	62,54	38,54
TD01	B-01	379,8	2,8	1,7
	B-02	379,8	2,3	1,7
	B-03	379,8	1,7	1,7
	B-04	379,8	1,6	0,8
	B-05	379,7	5,3	2,6
	B-06	379,7	2,5	1,9
	B-07	379,7	6,2	4,6
	B-08	379,7	2,3	1,7
	B-09	379,7	2,3	1,7
	B-10	379,7	2,2	1,6
TD02	B-13	379,9	2,4	1,8
	B-14	379,7	2,3	1,7
	B-17	379,9	1	0,5
	B-18	379,9	2,1	1,6
	B-19	379,9	1,9	1,4
TD03	B-21	380	2,5	1,9
	B-22	380	5,2	3,2
	B-23	380	0,8	0,4
	B-24	380	2,5	1,9
TD04	B-25	379,6	9,3	9,5
	B-26	379,6	9,3	9,5
	B-28	379,6	1,1	0
TD05	B-176499	379,8	4,1	0
TD06	B-30	364	62,12	38,52

Los resultados del balance de potencia, carga y pérdidas totales del sistema se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Balance de potencia y pérdidas eléctricas del sistema eléctrico.

		Actual		Proyectado	
		P(kW)	Q(kW)	P(kW)	Q(kW)
Potencia de:	Suministro	76.34	55.3	138.8	93.84
	Cargas	76.2	55.3	138.12	93.82
Pérdidas en la Red		0.14	0	0.68	0.02

### 5.2.2 Tensiones en barras y control de reactivos

Los resultados de tensiones en barras (Tableros) para el caso actual es aceptable, mientras que con la nueva carga (motor de 75 HP) será necesario una compensación reactiva para lo cual se recomienda un banco de condensadores en los tableros donde la tensión es baja y en el tablero donde la nueva carga estará conectada, ya que se observa que los demás tableros mantienen sus tensiones anteriores bajo este nuevo escenario.

El software especializado, luego de 2 iteraciones consiguió la convergencia y como resultado muestra que es necesario compensación en 2 tableros de distribución: en el tablero TD01 es necesario una compensación de 3,265 kVAr y en el tablero TD06 se necesita una compensación de 0,472 kVAr; en esta última estará conectada la nueva carga. Utilizando la ec.(3.4), y considerando que el banco de condensadores estará conectado en estrella trifásico y a una tensión nominal de 0,38 kV, frecuencia nominal de 60 Hz; se puede calcular el valor de las capacitancias de los condensadores, resultando iguales a 230,53 uF y 409,44 uF respectivamente.

### 5.2.3 Flujos de potencia y sobrecarga de redes

En las condiciones actuales no se tiene sobre corrientes, pero con la inclusión del motor de 75 HP se tendrán valores de corriente que casi alcanzan su capacidad máxima de conducción de los conductores en algunos tramos de la red, los resultados de flujos de potencia y sobrecarga de redes (en cables) son mostrados en la Tabla 5.4.

En dicha Tabla, se observa que no hay sobrecarga en ningún cable de la instalación eléctrica, pero hay 2 cables donde el valor de la corriente es próximo al límite, esto es, en las líneas L25, L26 del tablero de distribución TD04 donde se tienen motores de 7,5HP y también como era de esperar ocurre lo mismo en la línea L30 del tablero TD06 donde se ubica el motor nuevo a incorporarse.

El diagrama unifilar del sistema eléctrico de la planta industrial de procesamiento de frutas, motivo de este estudio se encuentra en el Anexo B.

### 5.3. Análisis de Tensiones para Arranque de Motores

El análisis de tensiones consiste en realizar estudios de arranque de motores para comprobar las variaciones de torque (mecánico y eléctrico) y tensiones que las máquinas asíncronas originan al momento de entrar en operación. La red eléctrica y sus componentes pueden modificar el esquema inicial de arranque y perturbar las variables de operación del sistema como: flujos y corrientes de entrega en elementos, etc.

Tabla 5.4. Flujos de potencia y sobrecarga de redes Previstos.

Lineas de la Red Eléctrica		I (A)
Cables a los Tableros	TD-01	58,152
	TD02	15,414
	TD03	21,177
	TD04	59,076
	TD05	6,248
	TD06	113,46
Cables a las cargas	L01	4,98
	L02	4,348
	L03	3,655
	L04	2,72
	L05	8,975
	L06	4,774
	L07	9,447
	L08	4,348
	L09	4,348
	L10	4,136
	L15	4,348
	L13	4,772
	L14	4,559
	L17	1,699
	L18	4,012
	L19	3,587
	L21	4,771
	L22	8,362
	L23	1,359
	L24	4,771
L25	54,164	
L26	54,165	
L-28	1,74	
L29	6,248	
L30	113,46	

### 5.3.1 Modelos para arranque de motores

Los distintos componentes que conforman el sistema eléctrico son modelados de acuerdo a su representación para análisis de arranque de motores. Este análisis depende de similares valores en los parámetros usados en el flujo de carga en la mayoría de los casos, pues la simulación de arranque de motores es una secuencia de cálculos de flujo de carga.

### 5.3.2 Equivalente de red

El punto de entrega de energía SEIN es modelado como un equivalente de red en la barra 0,38kV. Este equivalente Thevenin es similar al usado para el análisis de flujo de carga.

### 5.3.3 Elementos de la red: cables y tableros

Cada elemento de red (cables y tableros de distribución) se representa por sus elementos del circuito equivalente: resistencias, inductancias y capacitancias. Se asume un sistema trifásico balanceado, de modo que se pueda hacer uso de una representación monofásica de la red, en el sistema de secuencia positiva. Estos modelos también son similares a los usados para el análisis de flujo de carga.

### 5.3.4 Cargas asociadas a motores

En cada paso de cálculo (Flujo de Carga), la impedancia del motor (máquina asíncrona) se modifica en función del incremento en velocidad y resistencia (pérdidas por corrientes de Eddy) así como de las reactancias de dispersión (decremento de la saturación). En la Figura 5.1 se muestra el circuito equivalente de la máquina asíncrona.

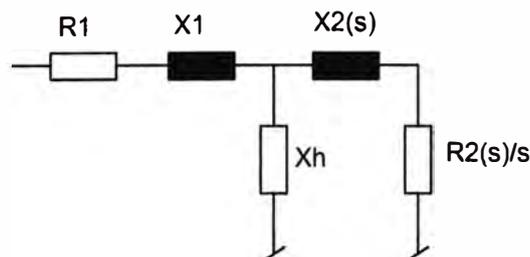


Figura 5.1. Circuito equivalente de la maquina asíncrona.

Hay dos posibilidades para calcular el modelo de arranque de la máquina asíncrona. La primera es una forma simplificada, pues la resistencia del rotor  $R2(s)$  y la reactancia de dispersión  $X2(s)$  se calculan para  $s = 1$  y  $s = sr$ , y se interpolan linealmente entre los dos puntos. La segunda posibilidad es ingresar curvas predefinidas para  $M/Mr$  e  $I/Ir$  lo más precisas posible (curvas dadas por el fabricante).  $R2$  y  $X2$  se pueden calcular para cada punto a partir de los valores ingresados.  $R2$  y  $X2$  se interpolan linealmente entre estos puntos ingresados. Al utilizar estas curvas exactas de  $R2$  y  $X2$  para el modelo de la

máquina asíncrona, el torque electromagnético  $M_e$  y la corriente  $I$  se pueden calcular para cada deslizamiento posible  $s$ .

### **5.3.5 Dispositivos de arranque de motores**

Estos dispositivos son los necesarios para el proceso de arranque durante los cálculos de arranque de motores. Se debe especificar el tiempo en segundos para el arranque del motor.

Dentro del equipamiento de arranque se encuentran las siguientes opciones:

- Arranque Directo.
- Arranque Delta – Estrella y por Z estator.
- Impedancia de arranque en estator.
- Resistencia de arranque de rotor.
- Arranque con autotransformador.
- Arranque con compensación.

Para fines de simulación se eligió la opción de arranque directo para los motores correspondientes.

### **5.3.6 Cargas asociadas a iluminación**

Las cargas, sea en condiciones actuales o futura (con la inclusión del motor de 75 HP), son modelados en régimen permanente similar al análisis de flujo de carga; es decir, en ambos casos se considera constante.

### **5.3.7 Capacitores shunt**

Como se explico en el análisis de flujo de carga en el futuro será necesario compensadores shunt para mejorar el factor de potencia, aunque ya se han calculado los valores de la capacitancia de los bancos de condensadores para la simulación de arranque de los motores no se han considerado, con el objetivo de tener el escenario mas desfavorable.

### **5.3.8 Resultados del análisis de Tensiones**

Se realizaron las simulaciones de arranque de motores de acuerdo a las premisas anteriores para condiciones de operación normal y se hizo el análisis del torque mecánico, torque eléctrico en el momento del arranque, para mejores observaciones se presenta los resultados gráficos de los mismos.

### **5.3.9 Torque mecánico y eléctrico de motores del sistema**

Entre las cargas seleccionadas para el análisis de niveles de tensión en el arranque, se consideró por su mayor potencia únicamente el motor que entrará en servicio a futuro:

motor para molino de granos (75 HP). El tiempo de simulación total fue de 20 segundos con tiempos de arranque de 2 a 3 segundos aproximadamente. Los resultados se muestran en la Fig.5.2, donde se tiene el torque electromagnético (Me) y el torque mecánico (MI), las tensiones (V) y corrientes de arranque (A), las potencias activa (P) y reactiva (Q) en el arranque y también el deslizamiento (s) y la velocidad mecánica relativa (n/n<sub>s</sub>)

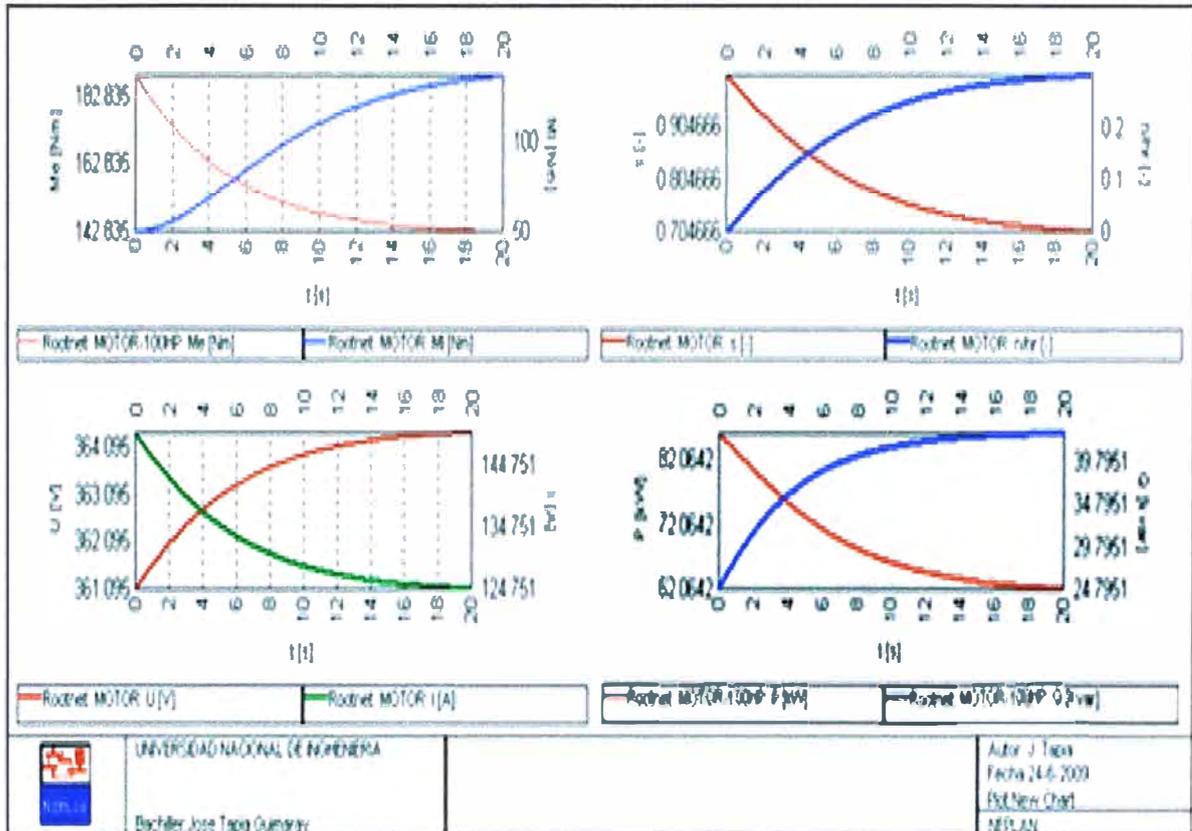


Fig.5.2. Curvas características en el arranque del motor de 75 HP

### 5.3.10 Tensiones en motores del sistema

La barra más afectada en el arranque del motor considerado para este análisis, fue aquella donde dicho motor estará conectado y la subsiguiente aguas arriba. Se han escogido las dos barras: la barra del tablero general (TG) y la otra donde el motor estará conectado (TD06). Los resultados de las variaciones de tensión durante el arranque se muestran en la Tabla 5.5, para condiciones normales de operación y para la carga prevista.

### 5.4. Análisis de distorsión armónica

El análisis de distorsión armónica consiste en determinar las magnitudes de corrientes en la red eléctrica y tensiones en barras del sistema para cada frecuencia armónica, y variables de interés como: THD, tensiones en barras, entre otros. A partir de estos resultados se puede evaluar las frecuencias de resonancia del sistema y también pueden ser probadas medidas de atenuación de armónicos.

Para este análisis se usó la herramienta de flujo de armónicos incluida en el software de simulación de redes eléctricas NEPLAN versión 5.2.4

Los distintos componentes que conforman el sistema eléctrico son modelados de acuerdo a su representación en régimen permanente (frecuencia fundamental) y para cada frecuencia armónica. Las prácticas recomendadas para análisis de armónicos en sistemas de potencia comerciales e industriales se encuentran en el estándar IEEE 519-1992 de la referencia [2]. Y cuyos valores se muestra en la Tabla 5.6. Se observa que la máxima distorsión armónica para tensiones es de 5%.

Tabla 5.5. Tensiones durante el arranque del motor proyectado.

<b>BARRA</b>	<b>TD06</b>	<b>TG</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Tensión(V)</b>	<b>Tensión(V)</b>
0	357,742	368,842
1	359,141	370,025
2	360,233	370,629
3	360,463	370,978
4	360,889	371,189
5	361,115	371,32
6	361,235	371,403
7	362,435	372,456
8	362,625	372,489
9	362,815	372,511
10	362,905	372,725
11	363,175	372,934
12	363,215	373,439
13	363,305	373,543
14	363,345	373,846
15	363,485	374,047
16	363,555	374,548
17	363,685	374,849
18	363,815	375,119
19	363,985	375,549
20	364,01	375,655

Tabla 5.6. Límites permitidos de distorsión de tensión – IEEE estándar 519

<b>Tensión de Barra en PCC</b>	<b>Tensión Individual Vh (%)</b>	<b>THD de Tensión (%)</b>
<b>V &lt; 69 kV</b>	<b>3.0</b>	<b>5.0</b>
<b>69 ≤ V &lt; 161 kV</b>	1.5	2.5
<b>V ≥ 69 kV</b>	1.0	1.5

Los diferentes elementos de la red fueron modelados de la misma forma que en el tema de arranque de motores con pequeñas variaciones que el software impone, entre dichos elementos tenemos: equivalente de red externa, cables de la red, cargas asociadas a la iluminación, motores eléctricos, etc.

**OBSERVACION IMPORTANTE:** En el análisis armónico se asume que los motores trabajan en régimen permanente, es decir el deslizamiento permanece en su valor nominal. La variación del deslizamiento solo tiene cabida en el arranque de los motores.

#### 5.4.1 Resultados del análisis de distorsión armónica

Los resultados de las máximas tensiones armónicas individuales y THDv son mostrados en la tabla 5.7. y como se puede observar son muy bajísimas, que no llegan ni al 1%, por lo que podemos afirmar que no es necesario ningún tipo de mitigación de armónicos.

Tabla 5.7. Máximas tensiones armónicas individuales y THDv

TABLERO	Vh (%)	THDv (%)
TG	1	1
TD01	0,97	1
TD02	0,97	0,98
TD03	0,97	0,98
TD04	0,97	1
TD05	0,97	1
TD06	1	1,02

Dentro del supuesto de existencia de distorsiones armónicas altas, sería necesario el diseño de posibles alternativas para la atenuación de armónicos, entonces es indispensable conocer los problemas asociados a resonancias en el sistema. Para esto se debe calcular las impedancias equivalentes armónicas en todos los posibles puntos de análisis.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

De acuerdo a los distintos temas abordados en este informe del sistema eléctrico de la planta procesadora agroindustrial, las conclusiones pueden enumerarse como se muestra a continuación.

1.- Con respecto a las pérdidas eléctricas, el sistema eléctrico en operación normal presenta pérdidas eléctricas bien bajas, las cuales son aceptables en operación. En condiciones de la inclusión del motor de 100HP las perdidas del 1.09% con respecto a la potencia de consumo son también aceptables.

2.- Con respecto al control de tensión, en la operación normal el sistema no presenta tensiones mayores a los límites permitidos por la norma técnica. En la condición futura, la operación de un solo banco garantiza mantener las tensiones de operación en los límites permitidos.

3.- Con respecto a las sobrecargas, no existen tales situaciones por lo que el dimensionamiento de las redes es la adecuada.

4.- Con respecto al torque mecánico y eléctrico en el arranque, se puede concluir que el arranque es suave, en todo instante el torque eléctrico es mayor que el torque mecánico, lográndose el arranque en tiempos aceptables, tales como: aproximadamente 20 segundos para el nuevo motor.

5.- Con respecto a las tensiones en el arranque, se observa que en todas las barras seleccionadas la tensión baja ligeramente en el arranque de los motores, pero luego se recupera hasta llegar a un estado de operación en régimen permanente, salvo en el tablero TD06 donde está conectado el motor nuevo y donde se recomienda la instalación de condensadores.

6.- La mayor distorsión armónica que se obtendría con la instalación del nuevo motor de 100 HP es de 1.02% . La compensación requerida de 0,472 Kvar. Es para mantener los niveles de tensión aceptables. En estas condiciones La presencia del fenómeno de resonancia es despreciable por lo que no es necesario implementar ningún tipo de mitigadores de armónicos.

Cuando existieran distorsiones armónicas altas, sería necesario el diseño de posibles alternativas para la atenuación de armónicos, entonces es indispensable conocer los problemas asociados a resonancias en el sistema para evitar daños en el banco de condensadores.

7.- Asimismo se puede mencionar algunas ventajas de la compensación reactiva, tales como:

- a) Reducción en la tarifa de energía, las compañías eléctricas penalizan el consumo de energía reactiva con el objeto de incentivar su corrección.
- b) Reducción de las pérdidas por efecto Joule, la compensación de la energía reactiva permite la reducción de las pérdidas Joule en los conductores y transformadores. Además estas pérdidas son contabilizadas como energía activa consumida (kWh) por el Contador de la Compañía Eléctrica, por lo que se traduce también en una reducción en los costos.
- c) Reducción de las caídas de tensión, la reducción de la corriente provocada por la compensación de la energía reactiva, reduce la caída de tensión en el cable de alimentación.

## **6.2. Recomendaciones**

A continuación se realizan las siguientes recomendaciones de acuerdo a lo siguiente:

- 1.- Para la operación óptima a régimen permanente, realizar el mantenimiento periódico de todas las instalaciones para que el desempeño sea como hasta hoy día.
- 2.- En la operación futura con la incorporación del motor de 100HP, es importante la operación continua de los condensadores, esto para mantener las tensiones en los límites permitidos. Así también se podría incluir el redimensionamiento del conductor de puesta a tierra para que ayude a disminuir el efecto de los armónicos.
- 3.- Para la instalación de un banco de condensadores en plantas industriales que tengan problemas de distorsión armónica alta será necesario la instalación de algún tipo de mitigadores armónicos que eviten el efecto de la resonancia y prevenga daños que afectarían al banco de condensadores.

## **ANEXOS**

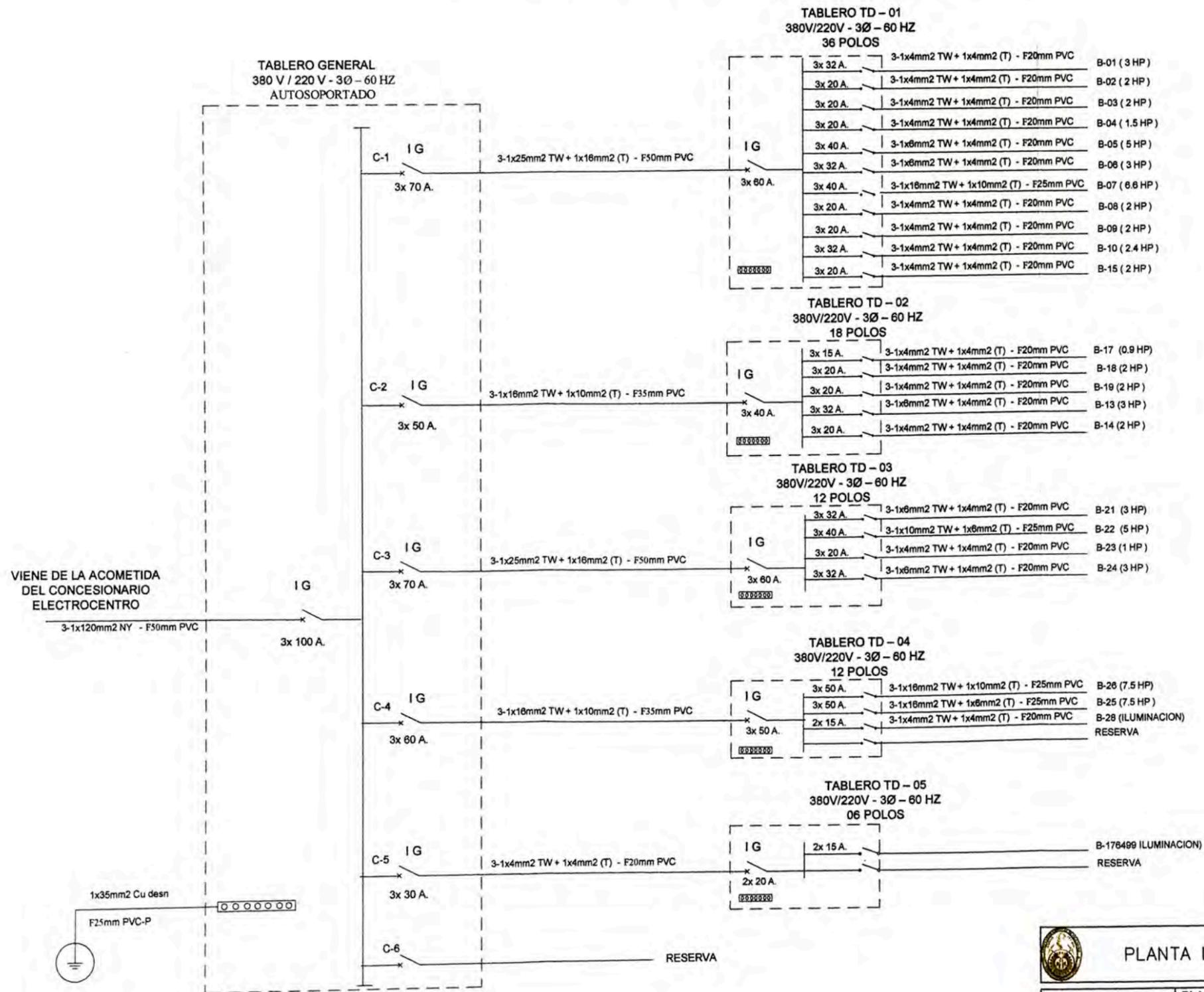
**ANEXO A**

**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS MAQUINARIAS Y EQUIPOS DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE PROCESAMIENTO DE FRUTA**

Nº	MAQUINA	LONGITUD CONDUCTOR	TABLEROS	CIRCUITOS DERIVADOS	TIPO DE MOTOR	MARCA	TIPO O MODELO	SERIE	HP	COS Ø	V	A	FHASE
01	TK-02	5.038	TD01	B-01	MOTOR	PEDROLLO	JCR-IOM	39638	3	0.8	220/379	5	3 Ø
02	M-01	6.424	TD01	B-02	JAULA ARDILLA	SIEMENS	1LAT 096-6YA80	4979	2	0.77	220/380	7.8/4.5	3 Ø
03	FJ-01	8.261	TD01	B-03	JAULA ARDILLA	C. NORD	SK 90L/4	Nm3451100	2	0.73	220/380	6.4/3.7	3Ø
04	M-02	9.757	TD01	B-04	JAULA ARDILLA	WEG	NER 7095	EV 68598	1.5	0.85	220/380	4.8/2.7	3Ø
05	EMC-01	11.517	TD01	B-05	JAULA ARDILLA	SIEMENS	1LAT 112-2YA80	232	5	0.86	220/380	16/9.2	3Ø
06	EP-02	13.838	TD01	B-06	JAULA ARDILLA	TOYAMA	Y 100L 1-4	70402120	3	0.8	220/380	8.3/4.8	3Ø
07	EP-01	16.577	TD01	B-07	JAULA ARDILLA	SIEMENS	1LA7 113-4YA80		6.6	0.83	220/380	19.6/11.3	3Ø
08	TJ-01	8.745	TD01	B-08	JAULA ARDILLA	SIEMENS	1LA7069-6YA80	4979	2	0.77	220/380	7.8/4.5	3Ø
09	TJ-02	11.385	TD01	B-09	JAULA ARDILLA	SIEMENS	1LA7096-6YA80	4979	2	0.77	220/380	7.8/4.5	3Ø
10	ELIC-01	13.585	TD01	B-10	JAULA ARDILLA	SIEMENS	1LA7090-2YC80	4989	2.4	0.83	220/380	7.0/4.1	3Ø
11	ELL	21.23	TD01	B-15	MOTOR	SIEMENS	1LA7090-6YA80	4979	2	0.77	220/380	7.8/4.5	3Ø
12	EFS(*)	9.02	TD02	B-17	MOTOR	SIEMENS	1LA70804YC80	4947	0.9	0.85	220/380	3.1/1.8	3Ø
13	ETC(*)	24.189	TD02	B-18	MOTOR	SIEMENS	1LA7090-4YA80	4973	2	0.8	220/380	7.0/4.0	3Ø
14	EEXAH(*)	33.836	TD02	B-19	MOTOR		Y2-90L-4	100161A1	2	0.8	220/380	6.2/3.6	3Ø
15	ETG-01	36.54	TD02	B-13	BOMBA	SIEMENS	24435		3	0.8	220/380	8.3/4.8	3Ø
16	ET-EMP	36.54	TD02	B-14	MOTOR	LUNITP H.	FH2480Z	650700100	2	0.8	220/	7.8/4.5	3Ø
17	TK-01	1.903	TD03	B-21	MOTOR	DELROSA	B90L4/ED/ER	2889/1009	3	0.83	220/380	8.3/4.8	3Ø
18	B-01	2.662	TD03	B-22	MOTOR				5	0.85	220/380	16/9.2	3Ø
19	B-02	2.398	TD03	B-23	MOTOR	PEDROLLO	JCRMiom		1	0.9	220/380	5	3Ø
20	EO1	6.281	TD03	B-24	MOTOR	F&W	965630		3	0.8	220/380	13.5	3Ø
21	CALDERO	8.316	TD04	B-26	MOTOR				7.5	0.7	220/380	20	3Ø
22	COMPRESORA	20.24	TD04	B-25	MOTOR	VALMEC	Y1325-4		7.5	0.7	220/380	20	3Ø
23	ILUMINA-01	200	TD04	B-28					1,15 kW	1	220		3Ø
24	ILUMINA-02	200	TD05	B-176499					4,11 kW	1	220		3Ø

# ANEXO B

## PLANTA INDUSTRIAL DE PROCESAMIENTO DE FRUTA



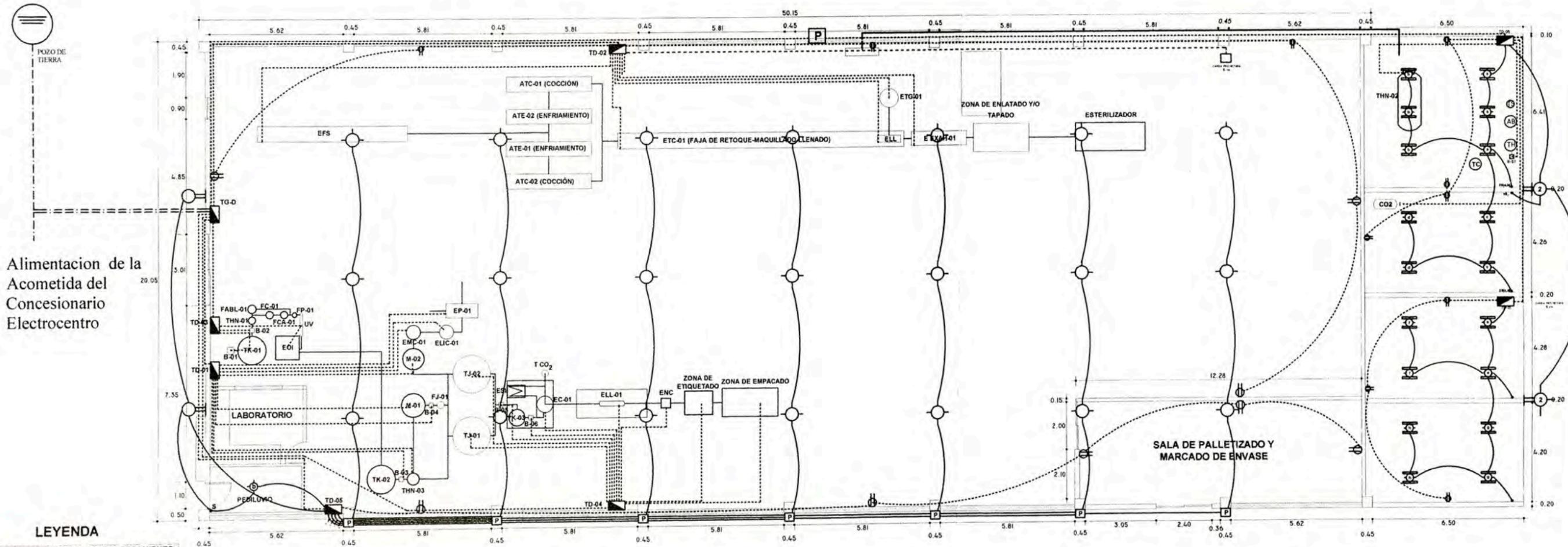
### LEYENDA

SIMBOLO	DESCRIPCION
	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO
	BORNE NEUTRO

PLANTA INDUSTRIAL DE PROCESAMIENTO DE FRUTAS			
<b>BACHILLER:</b>  <b>JOSE TAPIA GUIMARAY</b>	<b>PLANO:</b> DIAGRAMA UNIFILAR	<b>ANEXO:</b>  B	
	<b>LUGAR:</b> PAUCARTAMBO		<b>ESCALA:</b> S/E
	<b>DISTRITO:</b> PAUCARTAMBO		
	<b>PROVINCIA:</b> PASCO		
	<b>DISEÑO:</b> JOSE TAPIA G.		

# ANEXO C

## PLANTA INDUSTRIAL DE PROCESAMIENTO DE FRUTA



Alimentacion de la Acometida del Concesionario Electrocentro

### LEYENDA

- PLANTA AGROINDUSTRIAL DE PROCESAMIENTO DE FRUTA - PAUCAR TAMBO
- B Bomba
  - TK-01 Tanque reactor de tratamiento
  - THN Equipo hidroneumático
  - FABL Ablandador de agua
  - FC Filtro de cuarzo
  - FCA Filtro de carbón activado
  - FP Filtro pulidor
  - EOI Equipo de osmosis inversa
  - UV Equipo ultravioleta
  - TK-02 Tanque de almacenamiento de agua
  - M Marmita preparación de jarabe
  - FJ Filtro de jarabe
  - EMC Equipo molino coloidal
  - ELIC Equipo de licuado
  - TJ Equipo de mezclado
  - EP Equipo de pulpeado
  - ES Equipo de selección
  - TK-03 Premezclado
  - EC Equipo de carbo cooler
  - TCO2 Tanque de dióxido de carbono
  - ELL Equipo de llenado
  - ENC Equipo de coronado y encapsulado
  - EEST Equipo de esterilización
  - EENF Equipo de enfriamiento
  - EEXAH Equipo de exhausting
  - ETE Equipo de tanque de esterilización
  - EFS Equipo de faja de selección
  - ETG Equipo de tanque de gobierno
  - ZONA DE ETIQUETADO
  - ZONA DE EMPACADO



PLANTA INDUSTRIAL DE PROCESAMIENTO DE FRUTAS

BACHILLER:  
**JOSE TAPIA GUIMARAY**

PLANO:  
PLANO DE INSTALACIONES ELECTRICAS

LUGAR: PAUCARTAMBO ESCALA: S/E

DISTRITO: PAUCARTAMBO

PROVINCIA: PASCO

DISEÑO: JOSE TAPIA G.

ANEXO:  
  
C

## BIBLIOGRAFÍA

1. Red de Universidades UNIVERSIA.  
<http://www1.universia.net/CatalogaXXI/.../index.html>. Jul-2009.
2. IEEE Standard 519-1992 (recognized as an American National Standard (ANSI)),  
“IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric  
Power Systems”, New York, 1993.
3. H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae. “Generalized theory of the instantaneous  
reactive power in three-phase circuits,” IPEC'83-Int. Power Electronics Conf., Tokyo,  
Japan, 1983, pp. 1375-1386.
4. IEC 60831-1 International Electrotechnical Commission. “Shunt Power Capacitors of  
the Self-Healing Type for A.C. Systems Having a Rated Voltage up to and Including  
1000 V”
5. BCP Busarello, Cott, Partner Inc. Guía del Usuario del NEPLAN V5 , Zurich, Suiza.  
1988.
6. Ministerio de Energía y Minas del Perú, D.S N° 020-97-EM, Norma Técnica de  
Calidad de los Servicios Eléctricos, Lima - Perú, 1997.
7. INDECO, Catálogo de Cables de Energía, Lima-Perú.